

춘계 진해만에서 식물플랑크톤 증식과 제한영양염 분포특성

손문호^{1,2}, 김동선², 백승호^{2*}
¹부산대학교 해양학과, ²한국해양과학기술원

Distributional characteristics of phytoplankton and nutrient limitation during spring season in Jinhae Bay

Moonho Son^{1,2}, Dongseon Kim² and Seung Ho Baek^{2*}

¹Department of Oceanography, College of Natural Science, Pusan National University

²Korea Institute of Ocean Science & Technology

요약 춘계 진해만에서 식물플랑크톤의 분포특성에 영향을 미치는 영양염 농도 및 거동을 파악하기 위해서 총 23개 정점에서 2010과 2011년에 현장조사를 수행하였고, 지리지형학 특성과 오염물 부하를 고려하여 4개의 구역으로 구분하여 평가하였다. 진해만 광역해역에서 해역별 영양염 제한은 해수 순환이 원활한 중앙해역인 구역 II에서 80% 이상으로 가장 높게, 다음으로 서남해역의 구역 III과 IV에서는 17%-83%의 중간정도로 나타났으며, 마산만 인근의 반폐쇄적인 구역 I에서는 35%이하로 낮게 관찰되었다. 연도별 영양염 공급원으로는 2010년에는 오·폐수 등에 의한 질소기원 영양염의 유입이 높은 비중을 차지하였고, 2011년에는 강우에 의한 담수유입에 의하여 해역의 저염분화와 더불어 질소, 규소, 인 계열의 영양염이 동시에 유입되었다. 특히 2010년에는 질소계열의 영양염과 규조류(*Pseudo-nitzschia* spp.)의 높은 상관성을 보였고, 2011년에는 모든 영양염과 규조류(*Leptocylindrus danicus*)와 높은 관련성이 있었다. 결과적으로 춘계 진해만에 유입되는 질소 계열의 영양염은 규조류의 성장에 중요한 영향을 미쳤으며, 그들의 빠른 영양염 섭취(uptake)로 인하여 해역에 따라서 영양염 절대농도 뿐 만 아니라, 영양염 구성성분비의 제한을 일으킬 수 있다는 것을 파악하였다.

Abstract We investigated to assess the relationships between the major nutrients and phytoplankton dynamics during the spring season in 2010 and 2011 at 23 stations in Jinhae Bay, Korea. The bay is divided into four different zones based on pollutant sources and geographical characteristics. Nutrient limitation (>80%) was significant in Zone II, which is located in central bay and is influenced by the water well mixed from outer bay. The limited nutrient was followed in Zone III and IV that was occupying between 17% and 83%. However, the low levels are being kept below 35% in Zone I, which is characterized by the semi-enclosed eutrophic area of Masan and Haegam bays. Based on the PCA (principle component analysis) analysis, the nitrogen (N) sources in 2010 were particularly dominant and it may be due to the water mixing and wastewater formed from bottom layers and sewage. In 2011, major nutrients including nitrogen, silicon and phosphorus were dominant in the bay and are supplied by the river discharge after rainfalls with low salinity conditions. In particular, the N nutrients being supplied in 2010 are correlated with pennate diatoms *Pseudo-nitzschia* spp. and is not related to the phytoplankton population densities in 2011. The present study suggests that N sources play an important role in the proliferation of diatom, and the rapid nutrient uptakes by them are potential nutrient limitation factors in the bay.

Key Words : phytoplankton, Jinhae Bay, nutrient limitation, stoichiometric nutrient ratio

1. 서론

진해만은 반폐쇄성 내만으로 외해수와의 교환이 원활

하지 않고, 해안선의 굴곡이 심하며 수심이 비교적 얇은 특징을 가지고 있다. 진해만에 귀속된 마산만은 1960대 이후 생활하수와 산업폐수가 유입되어 만성화된 부영양

본 논문은 한국해양과학기술원의 연구과제 [남해특별관리해역의 관리를 위한 해양 생태계 건강지수 개발(PE99191)]로 수행되었음.

*Corresponding Author : Seung Ho Baek(Korea Institute of Ocean Science & Technology)

Tel: +82-55-639-8513 email: baeksh@kiost.ac

Received January 21, 2014

Revised March 11, 2014

Accepted May 8, 2014

화 지역으로 잘 알려져 있다[1]. 수질 개선을 위하여 하수 종말 처리장이 1993년과 2001년에 마산과 진해에 각각 건설되었으나, 해류의 순환이 원활하지 않아 마산만의 자체 수질은 크게 개선되지 않았다[2]. 이러한 마산만의 높은 오염물 부하량은 진해만 전 해역에 걸쳐 식물플랑크톤의 대발생을 초래 할 수 있는 개체군 유입원으로서 중요한 요인으로 작용된다[3]. 반면 진해만의 서 남부 해역에 위치한 고현만과 원문만에서 식물플랑크톤 증식의 국부적인 특징을 보인다. 결과적으로 진해만 식물플랑크톤 군집조성 및 대발생 특징은 영양염 농도에 좌우되어 해역별로 다른 특성을 보일 것으로 사료된다.

식물플랑크톤 성장의 제한 영양염을 분석하는 방법으로는 절대 영양염 농도의 하한치 값을 측정하는 법 ($N < 1 \mu M$, $P < 0.2 \mu M$, $Si < 2 \mu M$) 과 영양염 (N:P:Si = 16:1:16)의 상대적인 비를 평가하는 방법 등이 있다[4]. 진해만에서의 제한 영양염에 대한 조사는 식물플랑크톤의 대발생 시기에 따른 질산염과 인산염 제한의 변동 특성[5]과 함께 질산염 제한이 나타난 동계의 식물플랑크톤 분포 조사[6] 등이 있다. 이와 같이 진해만에서의 제한 영양염은 조사시기와 해역에 따른 차이를 보이지만, 제한영양염의 해역별 특징에 따른 식물플랑크톤 분포에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

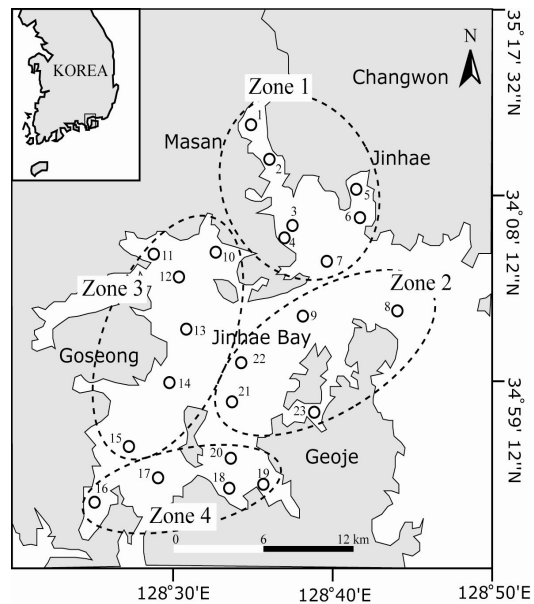
따라서 본 연구는 진해만에서 춘계 식물플랑크톤의 군집구조와 증식패턴에 영향을 미치는 영양염 농도와 년도별 특성을 파악하기 위해서 2010년, 2011년도에 해역별로 조사하였다. 결과적으로 어느 해역에 어떠한 영양염이 식물플랑크톤 성장의 제한요인으로 작용하는지 구체적으로 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

진해만 현장조사는 2010년 5월 4-5일과 2011년 5월 3-4일에 23 개 정점에서 한국해양과학기술원 연구선 (R/V 장목1호)으로 수행되었다[Fig. 1]. 각 정점에서 수심별 수온과 염분은 CTD (Sea-Bird 9, USA)를 이용하여 측정하였다. Chlorophyll *a* (Chl. *a*) 측정을 위해 각 층의 해수 500 mL를 선상에서 GF/F여과지 (47 mm Whatman glass fiber filters)로 여과한 후 15 튜브에 넣어 현장에서 냉동 보관하여 실험실로 운반하였다. 영양염 분석용 시료는 GF/F여과지를 통과한 여과해수 20 mL를 30 mL

PC병에 넣고 냉동 보관하였다.

Chl. *a*분석은 90% acetone 6 mL을 넣고 24시간 냉암소에서 염록소를 추출한 후 형광측정기(Turner Designs 10-AU Fluorometer)로 수행하였다. 영양염류는 분석 전 해동하여 규산염(SiO_2-Si), 암모니아성 질소(NH_4-N), 아질산과 질산성 질소(NO_2-N, NO_3-N), 인산염(PO_4-P)을 자동영양염분석기(Bran Luebbe)로 분석하였고[7], 용존 무기 규소(이하 DSi), 용존 무기 질소(이하 DIN, $NH_4-N + NO_2-N + NO_3-N$), 용존 무기 인(이하 DIP)로 구분하여 결과에 반영하였다.



[Fig. 1] A map of the sampling stations at Jinhae Bay, Korea. The bay is divided into four different zones based on pollutant sources.

식물플랑크톤 종조성과 정량분석을 위해 500 mL용 채수병에 표층수와 저층수를 각각 500 mL를 넣고, 곧바로 Lugol용액으로 최종농도 1%로 고정하여 실험실로 운반하였다. 운반된 시료는 실험실에서 50 mL로 농축시킨 후 100-300 μL 분주하여 X20 또는 X40배율에서 동정 및 계수하였다. 광학현미경하에서 동정이 어려운 종은 속수준에서 동정하였다[8].

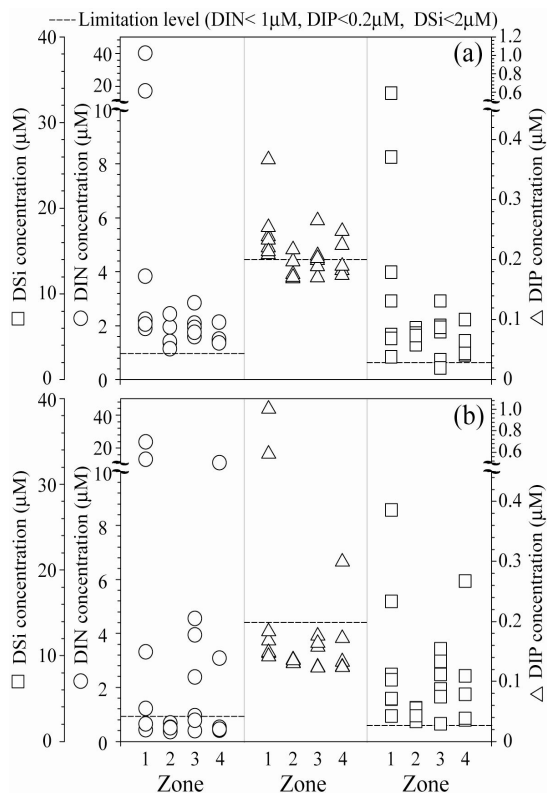
진해만의 현장자료는 오염원 유입 특성에 따른 지형학적 특징으로 4개의 구역(Zone)으로 나누어 해역별 분석을 수행하였다[9]. 구역 I은 마산만과 행암만의 반폐쇄성 해역(정점 1-7), 구역 II는 상대적으로 해수의 교환

이 원활한 진해만 중앙수역(정점8, 9, 21, 22, 23), 구역 III 은 수하식 굴양식장이 밀집된 진해만 서부해역(정점 10-15), 구역 IV는 주거도시와 조선 산업의 영향을 받는 통영(원문만)과 거제도(고현만)를 중심으로 하였고, 모든 통계처리는 XLSTAT 2012 (AddinSoft™) 프로그램을 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

진해만 구역 I 에 해당되는 마산만과 행암만 인근해역에서 무기영양염의 평균 농도는 2010년 DIN: $9.9 \pm 14.5 \mu\text{M}$, DIP: $0.25 \pm 0.05 \mu\text{M}$, DSi: $13.4 \pm 11.8 \mu\text{M}$ 로 관찰되었고, 2011년 DIN: $6.2 \pm 9.0 \mu\text{M}$, DIP: $0.34 \pm 0.33 \mu\text{M}$, DSi: $10.2 \pm 8.6 \mu\text{M}$ 으로 각각 관찰되었다. 구역 I 에서는 상대적으로 구역 II, III, IV 보다 상대적으로 높은 평균농도가 관찰되었을 뿐만 아니라 정점간의 차이 또한 크게 나타나 어떤 특정 정점에서의 점오염원 영향이 두드러졌다[Fig. 2]. 반면, 해수의 교환이 원활한 중앙해역에 해당되는 구역 II에서 2010년에는 DIN: $1.7 \pm 0.5 \mu\text{M}$, DIP: $0.19 \pm 0.02 \mu\text{M}$, DSi: $5.2 \pm 0.7 \mu\text{M}$ 로 각각 관찰되었고, 2011년에는 2010년보다 낮은 농도 (DIN: $0.5 \pm 0.1 \mu\text{M}$, DIP: $0.13 \pm 0.0 \mu\text{M}$, DSi: $3.2 \pm 0.7 \mu\text{M}$)가 관찰되었고, 정점간의 차이는 크지 않았다. 각 해역별 영양염의 절대농도에 의한 제한은 인산염에서 가장 높게 나타났으며, 이들 영양염의 제한 비율은 구역 II(80%) > 구역 IV(72%) > 구역 III(67%) > 구역 I(35%)의 순서로 나타났다. 다음으로 질산염 제한의 비율은 구역 II(50%) > 구역 IV(30%) > 구역 III(17%) > 구역 I(14%)의 순서로 나타났으며, 규산염의 제한은 뚜렷하게 관찰되지 않았다. 영양염 구성성분비의 제한은 반대로 질산염이 높은 빈도로 나타났으며, 구역 II에서 100%로 가장 높았고, 다음으로 구역 III(83%), 구역 IV(80%), 구역 I(57%) 순으로 나타났다[Fig. 3]. 인산염 제한은 구역 II에서 80%로 높았고, 구역 IV(70%), 구역 III(67%), 구역 I(35%) 순으로 관찰되었다. 특히 규산염의 구성성분비 제한은 단 한 정점에서 나타나, 춘계 진해만에서는 규산염에 의한 식물플랑크톤 증식의 제한은 나타나지 않을 것으로 사료되었다. 결과적으로 진해만의 제한 영양염 특성은 지형학적 및 오염원에 따라 구분되었고, 구역 I에서 점오염원에 의한 영양염의 높은 부하와 더불어 해수의 교환이 원활

하지 못하여, 공급된 영양염의 체류시간이 길어 영양염의 제한이 상대적으로 낮게 관찰되었다. 반면, 중앙해역인 구역 II에서는 해수의 교환이 원활하여 영양염의 절대농도 및 구성성분비에 의한 제한이 현저하게 높게 나타났다.



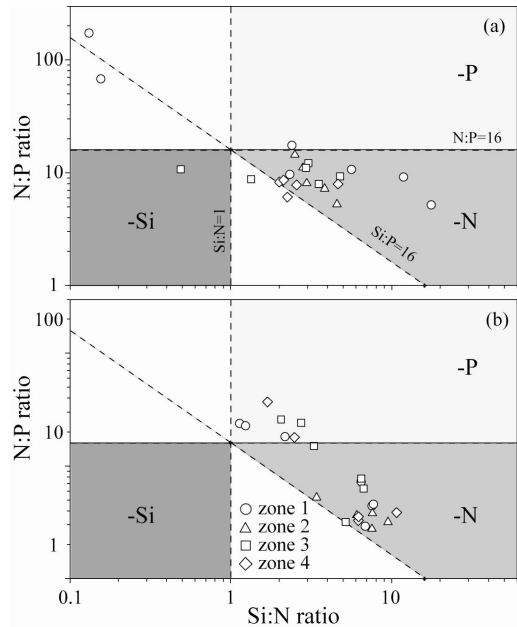
[Fig. 2] Variations of nutrients concentration in 2010 (a) and 2011(b) in different four zones of Jinhae Bay. The dotted base lines indicates the level of nutrients limitation. Circles: DIN, Triangles: DIP, Squares: DSi

식물플랑크톤의 현존량을 가늠할 수 있는 Chl. *a*의 농도는 구역 I에서 2010년 $8.4 \pm 4.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 로, 2011년 $5.8 \pm 1.4 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 각각 나타났으며, 이는 다른 구역보다 현저하게 높았다[Fig 4]. 반면, 상대적으로 영양염 제한이 높은 구역 II의 Chl. *a* 농도는 2010년 $2.7 \pm 0.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 2011년 $3.3 \pm 0.4 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 현저하게 낮게 나타났다. 구역 III, IV의 Chl. *a* 평균농도는 $2.5 \pm 0.8 \mu\text{g L}^{-1}$ 전후로 유사하였다. 식물플랑크톤 현존량은 구역 I과 구역 II에서 서로 다른 분포특성을 보였으나, 구역 III과 구역 IV는 유

사하게 나타났다. 이러한 식물플랑크톤의 분포양상은 앞서 언급한 영양염 농도의 해역별 분포와 일치하는 경향이 강하였다. 하지만, 2011년 구역 I에서 Chl. *a* 농도가 상대적으로 높았으나, 식물플랑크톤 현존량은 3.5×10^6 cells L⁻¹로 Chl. *a* 농도에 준하는 수준에 미치지 못하였다. 이러한 차이는 우점한 규조류 (Diatom) 종의 차이에 기인된 것으로 판단되며, 구역 I에서는 *Eucampia zodiacus*가 우점하였으나, 다른 구역에서는 *Leptocylindrus danicus*의 현존량이 상대적으로 높게 나타났다. *E. zodiacus*는 *L. danicus* 보다 단위 개체당 부피가 약 5배 높아 Chl. *a* 함량이 높게 나타나는 보고가 있다[10]. 결과적으로 구역 I에서 식물플랑크톤의 총 개체수 밀도는 낮게 나타났지만, Chl. *a* 농도가 높게 나타난 것은 세포크기에 기인된 Chl. *a* 함량의 차이로 확인할 수 있었다.

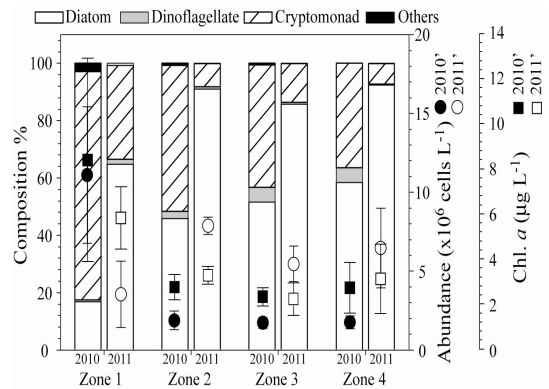
식물플랑크톤 분류군별 군집구조의 분포양상에서, 2010년과 2011년에 은편모조류 (Cryptomonad)와 규조류가 높은 밀도로 출현하였다[Fig. 4]. 2010년 구역 I에서는 은편모조류가 80%로 극우점하였으나, 구역 II에서는 은편모조류(51%)와 규조류(46%)의 비율이 유사하였다. 2010년에 구역 I에서 극우점한 은편모조류는 염분이 28.3 psu로 낮을 때 현저하게 증식하는 특이적인 양상을 보였고, 이는 낮은 염분에서 은편모조류가 우점한다는 기존의 보고와 일치하였다[11]. 반면, 2011년에는 규조류가 구역 I에서 65%, 구역 II에서는 91%로 높은 비율을 보였다. 상관성 분석(Pearson's correlation)에서도 2010년 은편모조류는 DIN과 높은 양(+)의 관계를 보였으며, 2011년 규조류는 DIN, DIP, DSi와 높은 양(+)의 관계를 보였다 ($p < 0.05$). 결과적으로 춘계 진해만에서의 영양염 농도는 해역별 식물플랑크톤 군집구조에 영향을 미친 것으로 판단되었다.

2010년 주성분 분석(PCA, principal component analysis)에서 제 1 주성분은 질소 계열의 영양염, Chl. *a*, 규조류로 나타났다[Table 1]. 특히 질소계열의 영양염 중 암모니아의 농도가 $3.9 \pm 7.3 \mu\text{M}$ 로 상대적으로 높게 관측되었다. 일반적으로 암모니아는 퇴적물에서 용출되거나, 생활하수 및 공장폐수로부터 기인하는 것으로 잘 알려져 있지만[12], 본 조사에서는 염분과 상관성이 낮은 것으로 보아, 수층혼합에 의한 저층으로부터 공급되었을 가능성이 높다.



[Fig. 3] Scatter diagrams of nutrient ratios at surface water in Jinhae Bay. Stoichiometric limitations are indicated as -N, -P and -Si. Each marks indicates the different zones. a:2010, b:2011

이와 같이 공급된 질소기원의 영양염은 은편모조류 및 규조류의 성장을 촉진시켜, 진해만해역에서 높은 밀도로 출현한 것으로 판단되었다. 반면, 2011년의 제 1성분에서 염분감소와 더불어 일정한 영양염류 (DIN, DIP, DSi)가 공급된 것으로 미루어 보아, 담수유입에 의한 육상기원의 영양염류가 진해만 해역에 유입된 것으로 판단되었다.



[Fig. 4] Variations of phytoplankton compositions, total abundances, and Chl. *a* concentration in 2010 and 2011 in different four zones of Jinhae Bay.

[Table 1] Loadings of environmental variables and phytoplankton bio-masses on the first three Varimax rotated principal components in 2010 and 2011 in Jinhae Bay. (loadings > 0.6 are bolded)

	2010			2011		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3
Temp.	0.30	0.32	0.57	-0.18	0.63	-0.12
Sal.	-0.31	-0.91	-0.07	-0.81	-0.28	-0.16
DIP	0.10	0.72	0.29	0.93	-0.03	-0.28
DSi	-0.18	0.89	0.19	0.91	-0.07	-0.31
NO ₃	0.95	0.11	0.20	0.94	-0.05	-0.25
NH ₄	0.93	-0.02	0.35	0.94	-0.04	-0.23
DIN	0.94	0.01	0.32	0.96	-0.05	-0.25
Chl. <i>a</i>	0.64	0.49	0.52	0.24	0.63	-0.06
Phyto.	0.44	0.11	0.88	-0.33	0.04	0.93
Diatom	0.66	-0.36	0.58	-0.33	-0.21	0.91
Dino.	-0.18	0.77	-0.22	-0.03	0.89	0.01
Crypto.	0.38	0.11	0.89	-0.09	0.81	-0.16
Eigenvalue	6.3	3.1	0.9	6.1	2.4	1.3
Variance(%)	34.2	27.0	24.4	44.7	19.8	17.7
Cumulative(%)	34.2	61.2	85.6	44.7	64.5	82.1

또한 갑작스러운 영양염 공급은 곧바로 식물플랑크톤의 현저한 증식을 유발하지 않았으나, 제 2성분과 3성분에서는 식물플랑크톤(규조류, 와편모조류, 은편모조류)와 유의한 값을 보인 것으로 보아, 일정한 시간의 경과(time lag)가 식물플랑크톤의 증식에 중요한 요인으로 작용할 것으로 판단되었다. 이와 같은 진해만의 식물플랑크톤의 군집구조와 해역별로 공급된 영양염의 분포 및 제한 양상을 파악하는 것은 해역별 오염정도를 평가할 수 있는 기초자료로 유용하게 활용될 것이다.

4. 결론

진해만은 오염물(영양염류)의 부하는 해수의 순환이 원활하지 않은 구역 I에서 높게 나타났으며, 오염원으로부터 거리가 멀고 해수의 순환이 원활한 구역 II에서 영양염 제한의 비율이 높게 나타났다. 특히 2010년에는 해저 퇴적물로부터의 질소계열의 영양염이 유입되었으나, 2011년에는 담수 유입과 더불어 일정한 영양염류가 공급되는 양상을 보였다. 이와 같은 해역별 오염원의 분포양상의 차이는 1차 생산자인 식물플랑크톤(유해유독종)의 초기 발생 및 대발생에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구와 같은 해역별, 연도별 식물플랑크

톤과 영양염과의 관계를 정기적으로 모니터링 하는 것은 국가 해양 생태계 정책을 수립할 수 있는 기초자료로 유용하게 활용가능 할 것이다.

References

- [1] C. W. Lee, B. Y. Min, "Pollution in Masan Bay, a matter of concern in South Korea", *Mar. Pollut. Bull.*, 21, 226-229, 1990.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0025-326X\(90\)90338-9](http://dx.doi.org/10.1016/0025-326X(90)90338-9)
- [2] D. -I. Lim, Y. O. Kim, M. R. Kang, P. -K. Jang, K. Shin, M. Jang, "Variability of water quality and limiting factor for primary production in semi-enclosed Masan Bay, south sea of Korea". *Ocean and Polar Res.*, 29, 349-366, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2007.29.4.349>
- [3] M. O. Lee, J. K. Kim, "Characteristics of algal blooms in the southern coastal waters of Korea". *Mar. Environ. Res.*, 65, 128-147. 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marenvres.2007.09.006>
- [4] R. Ptacnik, T. Anderson, T. Tamminen, "Performance of the redfield ratio and a family of nutrient limitation indicators as thresholds for phytoplankton N vs. P limitation". *Ecosystems*, 13, 1201-1214, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-010-9380-z>
- [5] M. S. Han, Y. O. Kim, J. K. Jeon, "Changes in phytoplankton community structure in the two different hydrological conditions of semi-enclosed Chinhae Bay, Korea". *Bull. Plankton Soc. Japan*, 41, 43-55, 1994.
- [6] B.-G. Hyun, K. Shin, D. S. Kim, Y O Kim, H. M. Joo, S. H. Baek, "Understanding of phytoplankton community dynamics through algae bioassay experiment during winter season of Jinhae Bay, Korea". *The Sea*, 16, 27-38, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7850/jkso.2011.16.1.027>
- [7] T. R. Parsons, Y. Maita, C. M. Lalli, "A manual of chemical and biological methods for seawater analysis". Pergamon Press, Oxford, pp 173, 1984.
- [8] J. D. Dodge, "Marine dinoflagellates of the British Isles". Her Majesty's Stationery Office, London. pp 303, 1982.
- [9] M. Son, S. H. Baek, H. M. Joo, P. G. Jang, Y. O. Kim, "Distributional characteristics of *Escherichia coli* and water pollution in Gwangyang Bay and Jinhae Bay, Korea". *Korean J. Environ. Biol.*, 29, 162-170, 2011.
- [10] J. Sun, D. Liu, "Geometric models for calculating cell

biovolume and surface area for phytoplankton, J. Plankton Res., 25, 1331-1346, 2003.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/plankt/fbg096>

[11] H. G. Marshall, R. V. Lacouture, C. Buchanan, J. M. Johnson, "Phytoplankton assemblages associated with water quality and salinity region in Chesapeake Bay, USA". Estuar. Coast. Shelf. Sci., 69, 10-18, 2006.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2006.03.019>

[12] M. -L. Wu, Y. -S. Wang, "Using chemometrics to evaluate anthropogenic effects in Daya Bay, China". Estuar. Coast. Shelf Sci., 72, 732-742, 2007.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2006.11.032>

백 승 호(Seung Ho Baek)

[정회원]



- 2004년 3월 : 요코하마국립대 환경정보학과 (환경학석사)
- 2007년 3월 : 요코하마국립대 환경정보학과 (환경학박사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 선임연구원

<관심분야>

해양환경오염, 수질, 해양생물학, 식물플랑크톤 생태학

손 문 호(Moonho Son)

[정회원]



- 2005년 2월 : 인제대학교 환경학과 (이학석사)
- 2008년 8월 : 부산대학교 해양학과 (박사수료)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연구사업인력

<관심분야>

해양생물학, 식물플랑크톤 생태학

김 동 선(Dongseon Kim)

[정회원]



- 1992년 3월 : 서울대 해양학과(해양과학석사)
- 1996년 3월 : 캘리포니아 주립대학 (해양화학박사)
- 1997년 1월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원

<관심분야>

해양환경오염, 수질, 해양화학